

УДК 534.6.08

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ АКУСТИЧЕСКОГО ТРАКТА СКВАЖИННОГО ГЛУБИНОМЕРА

А.И. Солдатов, Ю.В. Чиглинцева

Томский политехнический университет

E-mail: asoldatof@mail.ru

Проведен анализ акустического тракта скважинного глубиномера. Предложен метод двух компараторов для определения момента прихода отраженного со дна скважины акустического импульса, что позволяет повысить точность измерения глубины в 2...3 раза.

Ключевые слова:

Ультразвук, глубиномер, компаратор, волноводное распространение, эхо-импульс, точность измерения, погрешность, источник, приемник, локация.

Key words:

Ultrasound, depth gauge, comparator, waveguide propagation, echo pulse, measuring accuracy, error, source, receiver, location.

В технологическом процессе горнодобывающей промышленности одним из этапов подготовки добычи железной руды, угля и других полезных ископаемых являются взрывные работы. Затраты на производство взрывных работ составляют значительную часть в себестоимости добываемой горной массы. Причем основная часть этих расходов ложится на подготовку скважины и приобретение взрывчатых веществ. Поэтому получение достоверных результатов измерения глубины скважины необходимо для точного определения количества требуемого взрывчатого вещества. Ошибки в измерении глубины скважины приводят к ухудшению качества подготовительного этапа.

Существующие на сегодняшний день ультразвуковые скважинные глубиномеры имеют большую погрешность измерения и большую величину «мертвой зоны», обусловленную особенностями акустического тракта и поэтому не отвечают современным требованиям, предъявляемым к приборам подобного класса. В связи с этим повышение точности измерения скважинных глубиномеров на сегодняшний день является актуальной задачей.

Акустический тракт скважинных глубиномеров представляет собой волновод круглого сечения с жесткими стенками. Волноводное распространение акустических колебаний носит многомодовый характер, что приводит к изменению формы переднего фронта огибающей, увеличению длительности акустического импульса по мере его распространения по волноводу, что оказывает влияние на метрологические характеристики скважинного глубиномера. Поэтому для повышения метрологических характеристик прибора необходимо оптимизировать параметры акустического тракта: частоту излучения, размеры акустических датчиков, их пространственное положение и т. д.

Анализ волноводного распространения проведем с использованием метода геометрической акустики и Гюйгенса–Френеля. Для нахождения акустического пути рассмотрим продольный разрез волновода (рис. 1), на котором для примера показана траектория акустического луча при трех отражениях от стенки волновода.

Акустическая длина пути состоит из суммы отрезков между отражающими поверхностями:

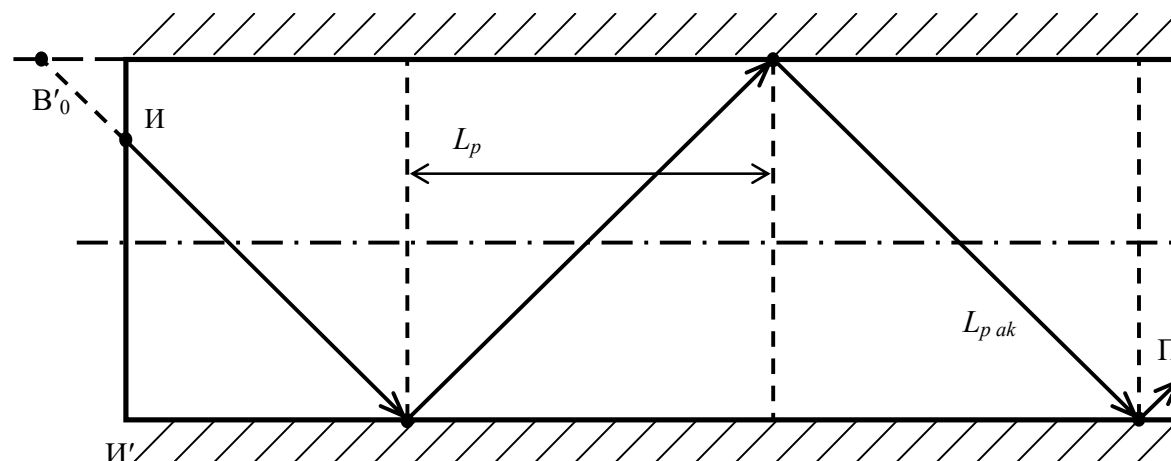


Рис. 1. Траектория акустического луча в продольном разрезе волновода при трех отражениях от стенки волновода

$$L_{ak} = \sum_i L_{iak},$$

где L_{ak} — акустическая длина пути ультразвукового луча, i — количество отражений.

Фаза сигнала на приемнике будет зависеть от пройденного пути:

$$\varphi = 2 \cdot \pi \cdot L_{ak} / \lambda,$$

Сигнал на приемнике определяется из выражения:

$$A = A_m \cdot \sin(\omega t + \varphi).$$

Просуммировав все возможные комбинации по отражениям найдем результирующую амплитуду сигнала для точечного излучателя и приемника:

$$A_T = \sum_i A_m \cdot \sin(\omega t + \varphi_i).$$

Количество отражений находится из условия полного внутреннего отражения луча при его падении на поверхность приемника:

$$i = \frac{L_{ak} \cdot \sin(\Psi_{кр})}{D},$$

где $\Psi_{кр}$ — критический угол падения, D — диаметр волновода.

Критический угол определяется из выражения:

$$\sin \Psi_{кр} = \frac{C_0}{C_1},$$

где C_0 — скорость распространения ультразвука в среде, заполняющей волновод, C_1 — скорость распространения ультразвука в протекторе приемника

Если излучатель и приемник не являются точечными, то проинтегрировав по площади излучателя и приемника можно найти результирующую амплитуду сигнала на приемнике

$$A_{рез} = \oint_{S_{np}} \oint_{S_{изл}} \sum_i A_m \cdot \sin(\omega t + \varphi_i) dS_{np} dS_{изл}. \quad (1)$$

При отражении от боковой поверхности волновода амплитуда отраженной волны изменяется при углах падения меньше критического. Величина изменения находится из формулы:

$$A_{отр.} = (K)^k A_m, \quad (2)$$

где $A_{отр.}$ — амплитуда отраженной волны, k — количество отражений, A_m — амплитуда падающей волны, $K_{отр}$ — коэффициент отражения.

Коэффициент отражения $K_{отр}$ находится из выражения [3]:

$$K_{отр} = \frac{Z_1 \cdot \cos^{-1} \varphi_{np} - Z_2 \cdot \cos^{-1} \varphi_{пад}}{Z_1 \cdot \cos^{-1} \varphi_{np} + Z_2 \cdot \cos^{-1} \varphi_{пад}}, \quad (3)$$

где Z и Z — акустические импедансы стенок волновода и заполняющей его среды соответственно, φ_{np} , $\varphi_{пад}$ — углы преломления и падения соответственно.

Угол падения $\varphi_{пад}$ можно найти, если известны углы падения в поперечном и продольном разрезах волновода [4]:

$$\varphi_{пад} = \arccos(\cos \beta \cdot \sin \alpha), \quad (4)$$

где β и α — углы падения в поперечном и продольном разрезах волновода соответственно.

Амплитуда прошедшей волны через протектор приемника можно найти из выражения:

$$A_{прош} = K_{прох} \cdot A_m, \quad (5)$$

где $A_{прош}$ — амплитуда прошедшей волны, $K_{прох}$ — коэффициент прохождения, A_m — амплитуда падающей волны.

Коэффициент прохождения $K_{прох}$ находится из выражения [3]:

$$K_{прох} = \frac{\rho_0}{\rho_1} (1 + K_{отр}), \quad (6)$$

где ρ_0 и ρ_1 — плотность среды, заполняющей волновод и стенки волновода соответственно.

Учитывая выражения (2–6) и подставляя их в (1) получим:

$$A_{рез} = \oint_{S_{np}} \oint_{S_{изл}} \sum_i A_{пад} \cdot (K_{отр})^k \cdot K_{прох} \cdot \sin(\omega t + \varphi) dS_{np} dS_{изл}.$$

По полученным выражениям были проведены расчеты амплитуды сигнала на приемнике в зависимости от расстояния между излучателем и приемником. На рис. 2 показаны расчетная и экспериментальная зависимости амплитуды сигнала на приемнике от расстояния для частоты 4 кГц. В качестве волновода использовалась труба диаметром 100 мм, изготовленная из нескольких слоев ватмана.

Некоторое несоответствие расчетных и экспериментальных зависимостей объясняется более высокими потерями на стенке бумажного волновода при отражении.

Основной вклад в величину погрешности вносит акустический тракт прибора, т. к. за счет волнового распространения меняется как амплитуда, так и форма эхо-импульса, поступающего на приемный датчик, рис. 3.

Отношение длительности переднего фронта огибающей к максимальной амплитуде импульса характеризует величину методической погрешности при определении глубины скважины (рис. 4), причем характер кривой зависит от параметров акустического тракта: частоты излучения, диаметра скважины и пространственного положения датчика.

Из приведенного на рис. 4 графика видно, что зависимость длительности фронта огибающей эхо-сигнала от расстояния имеет сложный характер, что ограничивает использование метода одного компаратора, получившего на сегодняшний день широкое распространение в приборах подобного класса. Вследствие изменения длительности фронта огибающей эхо-импульса, изменяется и погрешность измерения с увеличением глубины скважины. Существенно повысить точность измерения можно, если применить современные методы обработки эхо-сигналов. Одним из таких методов является метод двух компараторов с отличающимися порогами срабатывания (рис. 5).

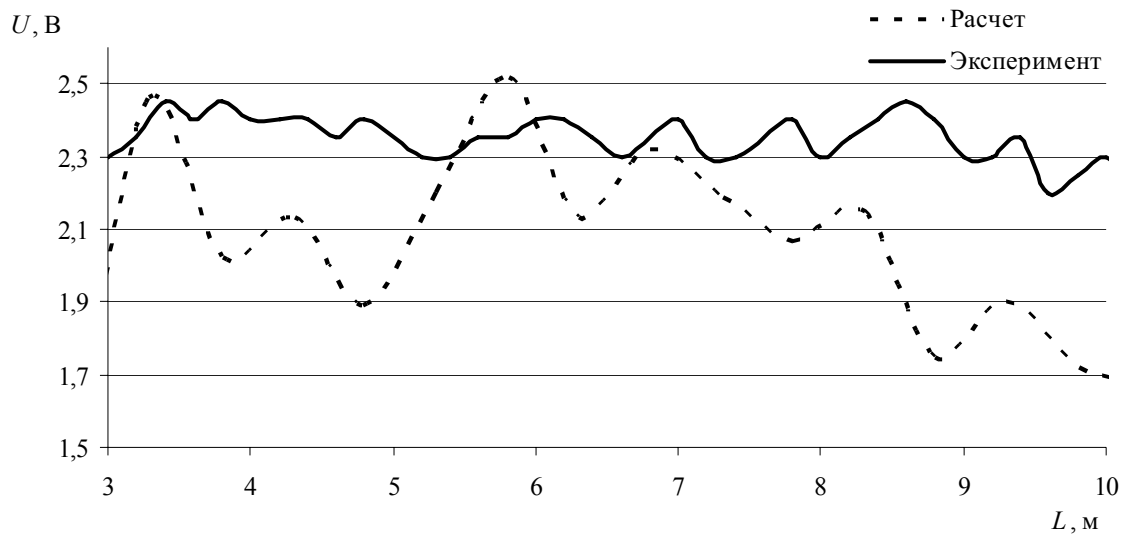


Рис. 2. Зависимость амплитуды сигнала на приемнике от расстояния между излучателем и приемником для частоты 4 кГц и диаметре волновода 100 мм

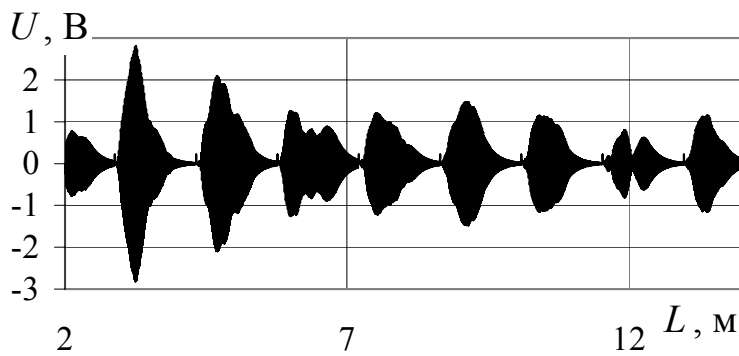


Рис. 3. Изменение формы и амплитуды акустического импульса при его распространении по волноводу круглого сечения с жесткими стенками

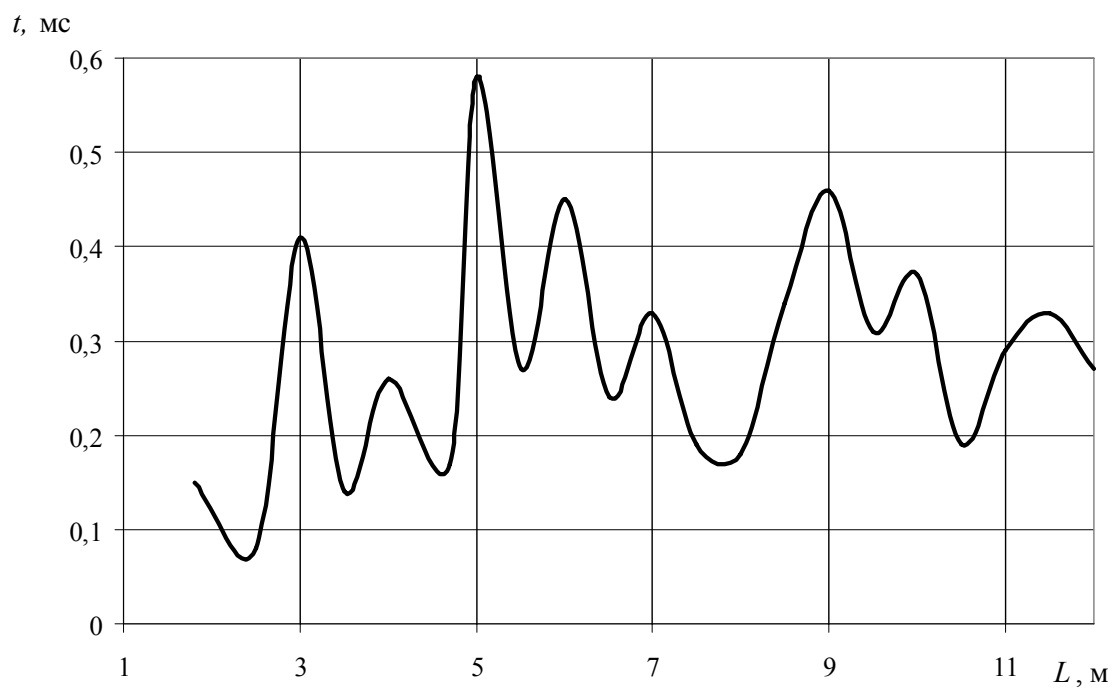


Рис. 4. График изменения длительности фронта огибающей эхо-импульса от глубины скважины для частоты 4 кГц, диаметре скважины 100 мм и осесимметричном положении датчика

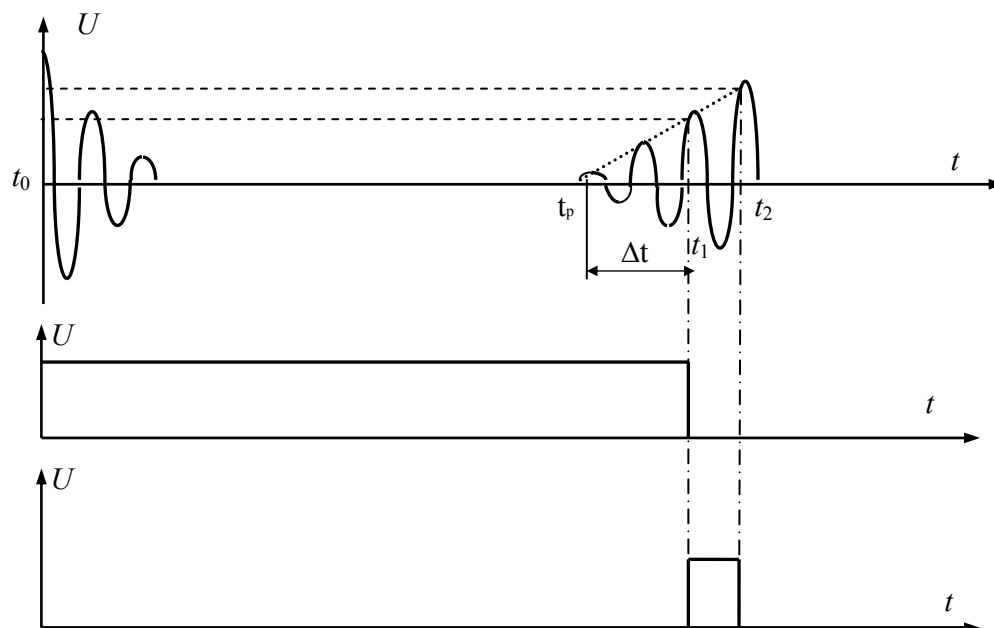


Рис. 5. Определение временного положения начала эхо-импульса методом двух компараторов

Срабатывание первого компаратора, имеющего уровень U_1 , происходит в момент времени t_1 , срабатывание второго компаратора, имеющего уровень U_2 , происходит в момент времени t_2 . Построение прямой по координатам этих точек позволяет найти временную координату начала эхо-импульса t_p [2] из выражения:

$$t_p = t_1 - \frac{U_1}{U_2 - U_1} (t_2 - t_1).$$

Для оценки возможно достижимой точности измерения ультразвукового локатора с использова-

нием этого метода были проведены лабораторные испытания, которые показали, что точность измерений напрямую зависит от величины выбранных порогов срабатывания компараторов. В эксперименте использовался волновод диаметром 100 мм, частота ультразвуковых колебаний – 4 кГц, дискретность измерения временного интервала между срабатываниями компараторов составляла 1 мкс. На рис. 6, 7 приведены экспериментальные данные зависимости величины погрешности измерения от глубины скважины для различных соотношений пороговых значений компараторов.

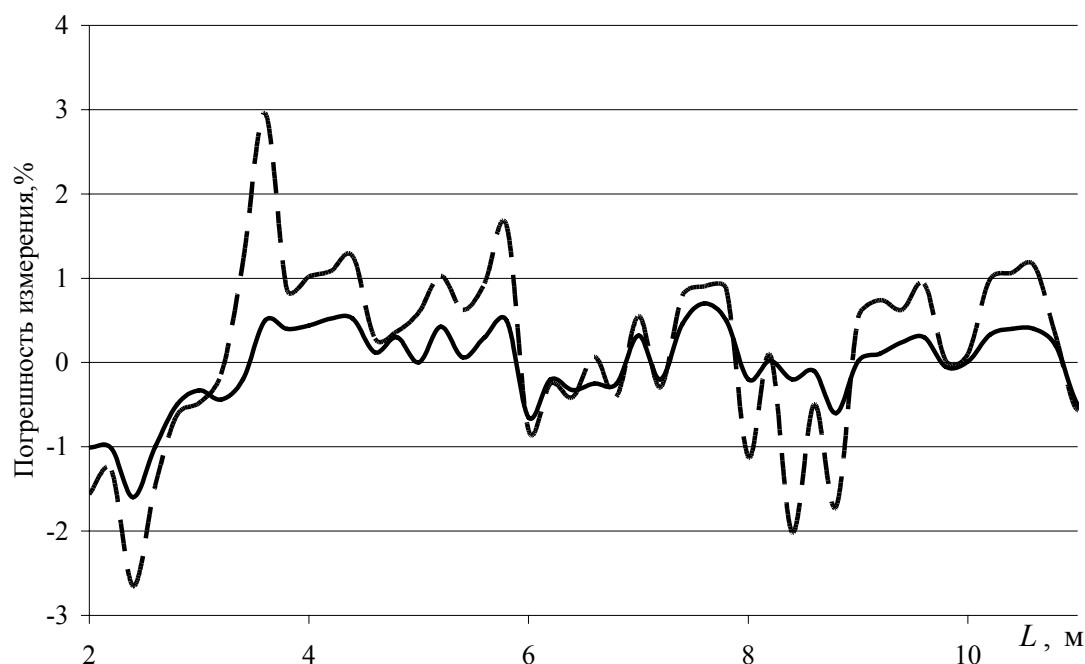


Рис. 6. Изменение погрешности измерения от глубины скважины, пунктир – метод одного компаратора, сплошная линия – метод двух компараторов ($U_1=0,6U_m$, $U_2=0,8U_m$)

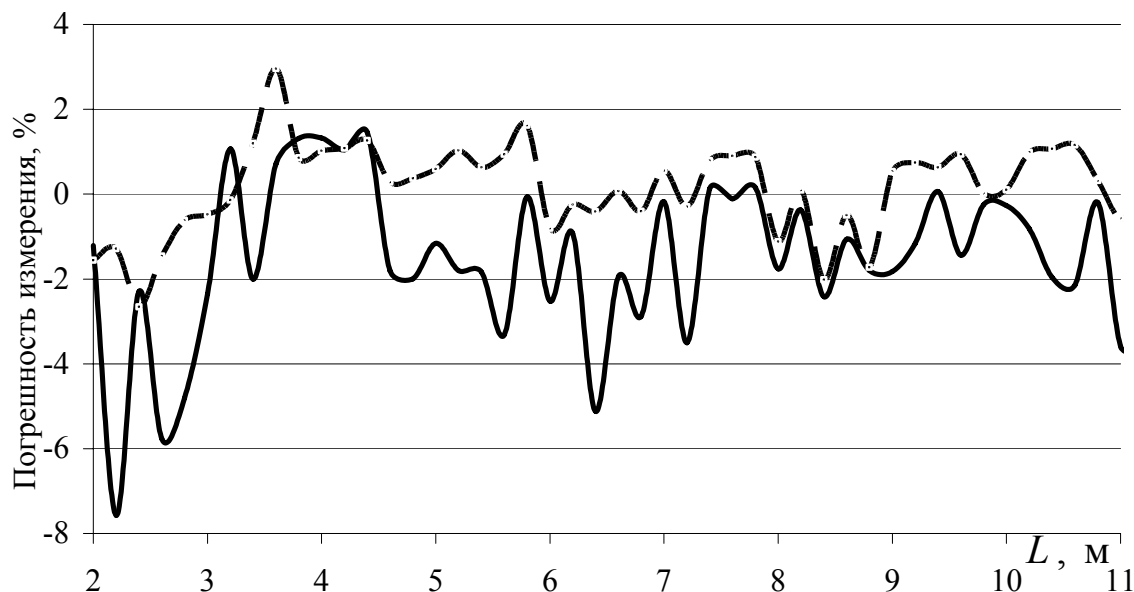


Рис. 7. Изменение погрешности измерения от глубины скважины, пунктир – метод одного компаратора, сплошная линия – метод двух компараторов ($U_1=0,21U_m$, $U_2=0,85U_m$)

Из графика, рис. 6, видно, что в случае неправильно выбранных порогов срабатывания компаратора, погрешность измерения при использовании этого метода превышает погрешность измерения методом одного компаратора.

При тщательном подборе порогов срабатывания, удастся снизить погрешность измерения в несколько раз, по сравнению с методом одного компаратора (рис. 7).

Применение метода двух компараторов для определения глубины скважины позволяет уменьшить погрешность измерения. Однако выбор оптимальных порогов требует детального анализа акустического тракта измерительного прибора. Кроме этого на результаты измерения будет влиять точность измерения интервала времени между включениями компараторов.

Выводы

1. На основе анализа акустического тракта скважинного глубиномера предложен метод двух компараторов для определения момента прихода отраженного со дна скважины акустического импульса.
2. Использование метода двух компараторов при условии правильного выбора порогов их срабатывания позволяет повысить точность измерения глубины в 2...3 раза.
3. К достоинствам метода следует отнести простоту, высокую точность измерений, дешевизну реализации.
4. Дальнейшие перспективы развития метода обусловлены возможностью повышения точности измерений путем использования четырех компараторов с положительным и отрицательным порогами срабатывания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Soldatov A.I., Chiglinseva J.V. Ultrasonic Borehole Depth-Gauge // International Siberian Conference on Control and Communications: Proceedings. – Tomsk, 2009. – P. 313–317.
2. Пат. на ПМ 75034 РФ. МПК⁷ G01F 23/28. Устройство компенсации погрешности измерения ультразвукового уровнемера / С.А. Цехановский, А.И. Солдатов. Заявл. 03.03.2008, Опубл. 20.07.2008, Бюл. № 20. – 5 с.: ил.
3. Бреховских Л.М., Годин О.А. Акустика слоистых сред. – М.: Наука, 1989. – 416 с.
4. Снайдер А., Лав Дж. Теория оптических волноводов / Пер. с англ. под ред. Е.М. Дианова и В.В. Шевченко. – М.: Радио и связь, 1987. – 656 с.

Поступила 16.07.2009 г.